

doi:10.15199/48.2021.06.31

## Badania symulacyjne przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie opartego o tranzystor GaN

**Streszczenie.** W artykule zostały zaprezentowane wyniki badań symulacyjnych przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie. Badany układ przekształtnika oparty został o tranzystor w technologii azotku galu GaN. Skupiono się na stratach mocy występujących w łączniku. Przedstawiono sposób obliczenia indukcyjności dławika. Symulacje układu przekształtnika wykonano z wykorzystaniem pakietu PLECS. Dobór i obliczenia strat mocy w dławiku wykonano z użyciem narzędzia projektowego firmy Micrometals Arnold.

**Abstract.** The article presents the results of simulation of a DC / DC boost converter. The converter was based on a GaN transistor. The focus is on the power losses in the transistor. It also presents the method of calculating the inductance of the choke. The converter simulations were made using the software PLECS. The selection core and calculations of the choke power losses were performed with the use of a design tool by Micrometals Arnold. (Simulation of a DC / DC boost converter based on a GaN transistor)

**Słowa kluczowe:** tranzystory GaN, przekształtnik DC/DC, energoelektronika.

**Keywords:** transistors GaN, DC/DC converter, power electronics.

### Wprowadzenie

Od kilku lat można zaobserwować wzrost zainteresowania nowymi materiałami półprzewodnikowymi w zastosowaniu do budowy łączników. Do tych należą przede wszystkim azotek galu GaN i węgiel krzemu SiC, ale również w niektórych zastosowaniach fosforek galu GaP. Trend ten jest uwarunkowany osiągnięciem uznawanych obecnie za maksymalne możliwości dla elementów wykonanych z krzemu. W publikacjach [1,2,3] zaprezentowano łączniki fotokonduktancyjne. Elementy te wyzwalane są do przewodzenia przy pomocy światła laserowego. Rozwiązanie takie pozwala na całkowitą izolację układów sterowania od torów prądowych, co może przynieść duże korzyści w zastosowaniu w łącznikach wysoko prądowych i wysoko napięciowych. Są to elementy dopiero w fazie początkowej i mimo intensywnych badań i rozwoju tej technologii nie znajdują jeszcze zastosowania w wykorzystywanych obecnie urządzeniach.

Praktycznie każde z urządzeń elektrycznych otaczających nas na co dzień wyposażone jest w układ zasilania dopasowujący parametry energii elektrycznej. Od falowników wykorzystywanych do sterowania silnikami elektrycznymi, w układach fotowoltaicznych oraz w filtrach aktywnych, po przekształtniki DC/DC występujące w ładowarkach czy systemach pojazdów elektrycznych. Wykorzystując elementy półprzewodnikowe oparte przede wszystkim o GaN w konstrukcjach układów energoelektronicznych można uzyskać większe sprawności i zmniejszenie wymiarów całego przekształtnika. Wynika to przede wszystkim z krótszych czasów przełączania, a więc większych częstotliwości łączeń, co dalej wpływa na mniejsze wymiary elementów biernych. Tranzystory z azotku galu cechują się również niską rezystywnością otwartego kanału. Stosowanie tranzystorów GaN w przekształtnikach energii elektrycznej oprócz korzyści wprowadza nowe wyzwania dla konstruktorów. Jak choćby rdzenia dławików dla dużych mocy i dużych składowych stałych prądu, czy zakłócenia wynikające z kluczowania z dużą częstotliwością. Przekształtniki oparte o nowe technologie półprzewodnikowe pozwalają na uzyskanie sprawności przekraczających 95%. Firmy posiadające w swojej ofercie tranzystory GaN to np. EPC, GaN Systems, Infineon, Transphorm. Są to zarówno elementy w standardowych obudowach, jak również w postaci elementów do montażu powierzchniowego (najczęściej o bardzo małych wymiarach)[4].

Przekształtniki energoelektroniczne budowane w oparciu o tranzystory wykonane w technologii GaN są często opisywane w artykułach [5,6,7,8,9,10,11,12,13,14]. Tematyką są przekształtniki o prostej budowie jak i te bardziej zaawansowane. Autorzy publikacji skupiają się również na układach sterowania tranzystorami z azotku galu [5,6] oraz nad modelowaniem i konstrukcjami dławików do tych przekształtników [6]. W dostępnych publikacjach można znaleźć przykłady przeróżnych zastosowań prezentowanych przekształtników. Od pojazdów elektrycznych, fotowoltaikę, po układy zasilania. Szeroki przekrój obejmuje też moce badanych przekształtników. Są to w niektórych przypadkach dziesiątki watów w innych pojedyncze kilowaty. W układach małych mocy częstotliwości kluczowania sięgają nawet 10MHz, podczas gdy dla układów dużych mocy są to setki kiloherców. Zastosowanie tranzystorów GaN ma szczególnie uzasadnienie w przekształtnikach twardo-przełączalnych, gdzie minimalizacja strat mocy na łączniku jest szczególnie istotna.

Autorzy artykułów [6,7,8,9,10] opisali badania nad przekształtnikami obniżającymi napięcie. W [6] zaprezentowano projekt sterownika bramkowego do tranzystorów GaN z wykorzystaniem układu scalonego IXDN609SI i zastosowaniem koralika ferrytowego celem wyeliminowania efektu Millera. Przedstawili również wyniki badań czasów przełączeń tranzystora RSJS3006F firmy RFMD oraz pomiary sprawności przekształtnika DC/DC obniżającego napięcie z 400V do 200V, uzyskując sprawność 98,8% przy częstotliwości 300kHz. W pracy przedstawiono także metodę doboru rdzenia dławika filtru wyjściowego przekształtnika pozwalającą na minimalizację objętości i masy. W pracy [7] przedstawiono izolowany pełno mostkowy przekształtnik DC/DC oparty o równoległe tranzystory GaN. W przekształtniku w miejscu każdego łącznika wykorzystano 4 równoległe tranzystory GaN EPC2010C. Zaprojektowany przekształtnik obniża napięcie z 130V na 52V przy częstotliwości kluczowania 50kHz i mocy wyjściowej 2,4kW. Autorzy publikacji uzyskali sprawność 98,5%. W pracy zaprezentowano również wyniki badań kamerą termowizyjną pracującego przekształtnika. Jako sterownik tranzystorów GaN wykorzystano układ LM5114 od Texas Instruments. W artykule [8] zaprezentowano badania rezonansowego przekształtnika obniżającego napięcie z 300-400V do 12V, o mocy 200W. Częstotliwość kluczowania układu to 500kHz, a maksymalna sprawność to 93,83%. Autorzy

przeprowadzili analizę charakterystyk i strat mocy w tranzystorach z azotku galu od GaN Systems (GS66508B) i Infineon (IPB65R065C7). Przeprowadzono analizę optymalizacyjną układu przekształtnika, sterowania oraz przeprowadzono testy eksperymentalne. W pracy [9] autorzy omówili przekształtnik obniżający napięcie z 48V do 12V oparty o tranzystory GaN i Si. Przeprowadzili w artykule analizę strat mocy i kosztów wykonania przekształtnika. Z przeprowadzonych przez autorów badań wynika, że przekształtnik hybrydowy GaN-Si cechuje się minimalnie lepszą sprawnością od układu opartego na samym azotku galu, jednocześnie przy niższych kosztach. Układ hybrydowy ma również lepszą sprawność niż oparty wyłącznie o tranzystory Si. Autorzy [10] opisali rezonansowy przekształtnik DC/DC oparty o tranzystory GaN HEMT. Parametry wykonanego układu to 24V napięcia wejściowego, 5V napięcia wyjściowego, przy 2A prądu obciążenia i częstotliwości kluczkowania 4MHz. W przekształtniku wykorzystano tranzystor GS61004B od GaN Systems. W artykule przedstawiono zasadę działania przekształtnika i procedurę projektowania.

W [11,12] zaprezentowano przekształtniki do zastosowań w pojazdach elektrycznych. Autorzy artykułu [11] opisali wyniki symulacyjne badania przekształtnika dwufazowego, dwukierunkowego opartego o elementy SiC i GaN. Porównano przekształtnik hybrydowy do opartego wyłącznie o elementy SiC. Wykorzystano tranzystory z azotku galu od GaN Systems (GS66516T) oraz MOSFET z węgliku krzemu od ROHM (SCT3017AL). Autorzy w wynikach przeprowadzonych symulacji uzyskali większą sprawność dla proponowanego układu hybrydowego w całym zakresie badanych mocy obciążenia 5-40kW. W pracy [12] przedstawiono przekształtnik składający się z układu podwyższającego napięcie oraz z izolowanego rezonansowego układu obniżającego. Przekształtnik podwyższający zastosowano w celu złagodzenia skutków spadków napięcia zasilającego. Sprawności eksperymentalne wyniosły 99,03% dla układu podwyższającego i 93,5% dla układu rezonansowego. Autorzy zaproponowali również modyfikację w postaci zrównoleglenia tranzystorów GaN, mającą na celu poprawę sprawności rezonansowego przetwornika obniżającego napięcie.

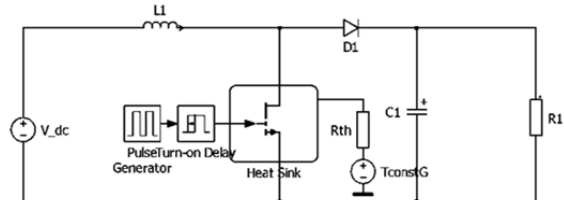
W artykule [13] autor zaprezentował falownik mostkowy o zakładanej mocy 2kVA i częstotliwości kluczkowania 250kHz. Przedstawiony model laboratoryjny uzyskał sprawność 98% przy mocy 1,6kVA. Autor proponuje hybrydowy układ z tranzystorami GaN i Si. Rozwiązanie takie ma uzasadnienie ekonomiczne. Dodatkowo przy zastosowaniu tranzystorów GaN pracujących z wysoką częstotliwością możliwe jest zredukowanie wymiarów filtru wyjściowego LC, a więc rozmiarów całego falownika.

Autorzy [14] poruszyli tematykę wykorzystania tranzystorów GaN w przestrzeni kosmicznej. Elementy elektroniki wykorzystywane w urządzeniach przeznaczonych do pracy w przestrzeni kosmicznej muszą być szczególnie odporne na zakłócenia jak np. w postaci promieniowania kosmicznego. Umieszcza je się w specjalnych obudowach które pogarszają parametry elementów elektronicznych. Niektóre tranzystory GaN HFET projektowane do zastosowań naziemnych można po odpowiednim przygotowaniu, przetestowaniu wykorzystać w przestrzeni kosmicznej.

### Badania symulacyjne przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie

Przeprowadzone zostały badania symulacyjne układu przekształtnika podwyższającego napięcie. Zbudowano układ twardo-przełączający. Do budowy układu wybrano tranzystor w technologii azotku galu GS66516T od GaN

Systems. Do badań wykorzystano pakiet oprogramowania PLECS. W modelu użytym do symulacji, elementy przekształtnika oprócz tranzystora GaN zostały uproszczone i zasymulowane jako idealne. Parametry tranzystora GS66516T to: napięcie przebicia 650V, rezystancja otwartego kanału 25mΩ i dopuszczalny prąd drenu 60A [15]. Przyjęto napięcie zasilające równe 40V, napięcie wyjściowe 400V, znamionowa moc wyjściowa przekształtnika 400W, częstotliwości kluczkowania 100kHz, 200kHz i 300kHz oraz współczynnik wypełnienia równy 0,9. Schemat badanego układu przedstawiono na rysunku 1. Celem jak najlepszego odwzorowania pracy tranzystora zasymulowano również jego parametry termiczne.



Rys.1. Schemat układu przekształtnika podwyższającego napięcie wykonany w pakiecie PLECS

Wartości indukcyjności dławików dla różnych częstotliwości kluczkowania (tabela 1) zostały dobrane na podstawie zależności:

$$(1) \quad L = \left(\frac{1}{f}\right) \cdot (V_{out} + V_F - V_{in}) \cdot \left(\frac{V_{in}}{V_{out} + V_F}\right) \cdot \left(\frac{1}{\Delta I_L}\right)$$

$$(2) \quad \Delta I_L = 0,4 I_{in} = 0,4 I_{out} \cdot \left(\frac{V_{out} + V_F}{V_{in}}\right)$$

gdzie: L – indukcyjność dławika, f – częstotliwość łączeń,  $V_{out}$  – wartość napięcia wyjściowego,  $V_F$  – wartość spadku napięcia na diodzie,  $V_{in}$  – wartość napięcia wejściowego,  $\Delta I_L$  – zmiany prądu dławika,  $I_{in}$  – prąd wejściowy,  $I_{out}$  – prąd wyjściowy.

Tabela. 1. Wartości indukcyjności dławika dla poszczególnych częstotliwości kluczkowania

Częstotliwość kluczkowania [kHz]	Indukcyjność dławika [ $\mu$ H]
100	90
200	45
300	30

W tabeli 2 przedstawiono straty mocy w tranzystorze GaN, uzyskane w wyniku badań symulacyjnych przetwornicy DC/DC podwyższającej napięcie. Przedstawiono wartości strat oraz temperaturę złącza tranzystora.

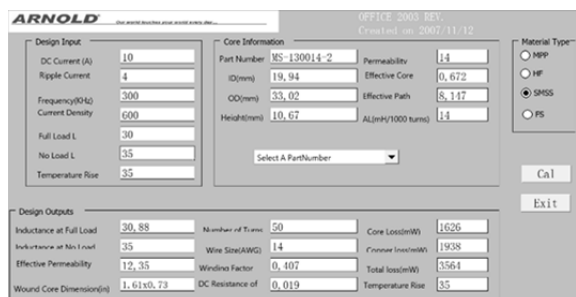
Tabela 2. Straty mocy w tranzystorze GaN dla znamionowej mocy układu

Częstotliwość kluczkowania [kHz]	Straty mocy [W]	Temperatura złącza [ $^{\circ}$ C]
100	2,95	38,9
200	3,27	53,9
300	3,61	69,9

Przeprowadzono również analizę strat mocy w dławiku przekształtnika, wykorzystując narzędzie projektowe firmy Micrometals Arnold. Na rysunku 2 przedstawiono widok programu pozwalającego na dobór odpowiedniego rdzenia i wyznaczenie podstawowych parametrów projektowanego dławika.

Do analizy przyjęto rdzenie proszkowe RTMSS z materiału Super-MSS firmy Micrometals Alloy Powder Cores. Są to rdzenie proszkowe toroidalne z rozproszoną szczeliną powietrzną. Nadają się do pracy w zakresie

częstotliwości 25kHz - 500kHz. W tabeli 3 zawarto wymiary dobranych rdzeni, natomiast tabela 4 zawiera wyniki analizy strat mocy w dławiku



Rys.2. Widok programu do doboru dławików firmy Micrometals Arnold

Tabela 3. Wymiary dobranych rdzeni

Indukcyjność dławika [μH]	Nazwa rdzenia	OD [mm]	ID [mm]	Height [mm]
90	MS-400026-2	101,60	57,15	16,51
45	MS-184026-2	46,74	24,13	18,03
30	MS-130014-2	33,02	19,94	10,67

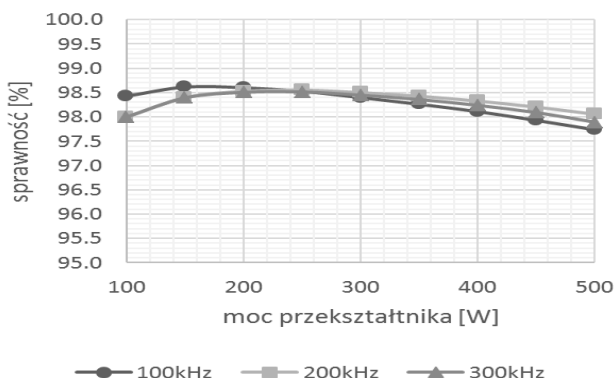
Tab. 4. Straty mocy w dławiku dla znamionowej mocy przekształtnika

Nazwa rdzenia	Częstotliwość kluczkowania [kHz]	Straty mocy w rdzeniu [W]	Straty mocy w miedzi [W]	Przyrost temperatury rdzenia [°C]
MS-400026-2	100	1,11	3,65	11,7
MS-184026-2	200	1,66	1,88	24,3
MS-130014-2	300	1,63	1,94	35,0

Na podstawie analizy strat mocy w tranzystorze GaN i dławiku przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie, wyznaczono sprawności dla poszczególnych częstotliwości kluczkowania. W obliczeniach nie zostały uwzględnione straty mocy na pozostałych elementach układu. Przeprowadzono badania dla obciążeń w zakresie mocy 100-500W. Wyniki symulacji przedstawiono w tabeli 5 i na rysunku 3

Tabela 5. Sprawność przekształtnika dla mocy znamionowej

Częstotliwość kluczkowania [kHz]	Łączne straty mocy [W]	Sprawność przekształtnika [%]
100	7,71	98,1
200	6,81	98,3
300	7,18	98,2



Rys.3. Zależność sprawności badanego przekształtnika w funkcji mocy obciążenia dla trzech częstotliwości kluczkowania

### Wnioski i podsumowanie

Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych potwierdzają korzyści z zastosowania tranzystorów GaN w wysokosprawnych przekształtnikach energii elektrycznej. W badanym przekształtniku podwyższającym napięcie dla

mocy znamionowej uzyskano sprawności przekraczające 98%, dla trzech przyjętych częstotliwości kluczkowania. Tranzystory te mają krótkie czasy przełączeń, co pozwala na wysokie częstotliwości pracy. Cechują się niską rezystancją otwartego kanału, co wpływa na małe straty przewodzenia. Zwiększanie częstotliwości kluczkowania przekształtnika wpływa na zmniejszenie wielkości rdzenia użytego do wykonania dławika, co przedstawiono w tabeli 3. W badanym przekształtniku podwyższającym napięcie, dla mocy znamionowej 400W uzyskano sprawności przekraczające 98% dla trzech przyjętych częstotliwości kluczkowania.

**Autorzy:** mgr inż. Piotr Paziewski, Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Elektroniki, Instytut Systemów Elektronicznych, E-mail: [piotr.paziewski@wat.edu.pl](mailto:piotr.paziewski@wat.edu.pl)

### LITERATURA

- [1] Marek Suproniuk, Mariusz Wierzbowski, Piotr Paziewski, Effect of generation rate on transient photoconductivity of semi-insulating 4H-SiC, SCIENTIFIC REPORTS, 10, 1, 2020
- [2] M. Suproniuk, P. Kamiński, R. Kozłowski, M. Pawłowski, M. Wierzbowski, Current status of modelling the semi-insulating 4H-SiC transient photoconductivity for application to photoconductive switches, Opto-Electronics Review 2017
- [3] M. Suproniuk, P. Kamiński, R. Kozłowski, M. Teodorczyk, A. Mirowska, E. Majda-Zdancewicz, M. Wierzbowski, K. Piwoński, P. Paziewski, Semi-insulating GaP as a material for manufacturing photoconductive semiconductor switches, Proceedings of SPIE 11055, XII Conference on Reconnaissance and Electronic Warfare Systems, 2018, Oltarzew, Poland
- [4] Piotr Paziewski, Henryk Supronowicz, Marek Suproniuk, Przekształtnik DC/DC podwyższający napięcie z wykorzystaniem tranzystora w technologii GaN, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, nr 10, 2017
- [5] Subhendu Bikash Santra, Aratrika Roy, Debashis Chatterjee, Design of bootstrap capacitor based GaN-FET driver for improvement in transient performance of DC-DC converter, 2020 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid and Renewable Energy, 2-4.01. 2020, Cochin, India
- [6] Piotr Czyż, Andrzej Reinke, Michał Michna, Zastosowanie tranzystorów GaN w wysokoczęstotliwościowych przekształtnikach DC/DC, Przegląd Elektrotechniczny, R. 93, nr 1, 2017
- [7] 07884476 Rakesh Ramachadran, Morten Nymand, Effectively paralleling GaN FETs to achieve ultra-high efficiency in an isolated DC-DC converter, 5th International Conference on Renewable Energy Research and Applications, 20-23 Nov 2016, Birmingham, UK
- [8] Yuanchao Liu, Ke Li, Weiping Zhang, Xiaoqiang Zhang, GaN-based high efficiency and high power density DC/DC power supply, 2018 1st Workshop on Wide Bandgap Power Devices and Applications in Asia, 16-18 May 2018, Xi'an, China
- [9] Lei Kou, Juncheng Lu, A GaN and Si hybrid solution for 48V-12V automotive DC-DC application, 2020 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, 11-15.10. 2020, Detroit, USA
- [10] Cai Si-Yuan, He Jun-Ping, Li Zi-Fan, Resonant DC/DC converter with class Φ2 inverter and class DE rectifier based on GaN HEMT, 2020 22nd European Conference on Power Electronics and Applications, 7-11 Sept. 2020, Lyon, France
- [11] Milad Moradpour, Gianluca Gatto, A new SiC-GaN-based two-phase interleaved bidirectional DC-DC converter for plug-In electric vehicles, 2018 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion, 20-22.06. 2018, Amalfi, Italy
- [12] Hiroaki Matsumori, Takashi Kosaka, Kisho Sekido, Kitae Kim, Takashi Egawa, Nobuyuki Matsui, Isolated DC-DC converter utilizing GaN power device for automotive application, 2019 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 17-21 March 2019, Anaheim, CA, USA
- [13] Jacek Rąbkowski, Tranzystory GaN w falowniku mostkowym o wysokiej częstotliwości przełączeń (250kHz), Przegląd Elektrotechniczny, R. 92, nr 5, 2016
- [14] Michaël Notarianni, Benoit Messant, Paul Maynadier, Using GaN HFET to replace MOSFET in DC/DC for space applications, 2019 European Space Power Conference, 30 Sept.-4 Oct. 2019, Juan-les-Pins, France
- [15] GS66516T Datasheet